

EL HORMIGON COMO FUENTE DE CAPTACION DEL DIOXIDO DE CARBONO ATMOSFERICO

Eperjesi Lilian N.

Unidad de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Civil (UIDIC).
Departamento de Construcciones. Facultad de Ingeniería. UNLP.
Calle 1 y 47, La Plata. E-mail: eperjesi@ing.unlp.edu.ar

Palabras Claves: carbonatación, hormigón, vida en servicio, captación CO₂ atmosférico.

Introducción

El impacto ambiental que produce la industria de la construcción, en particular la del hormigón, se manifiesta a través del empleo de recursos no renovables, consumo de energía y emisión de dióxido de carbono. De los materiales que componen el hormigón, el cemento es el más cuestionable ecológicamente. En el proceso de fabricación de cemento se emiten alrededor de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) por tonelada de producto, de las cuales aproximadamente el 60% proviene de la descomposición del carbonato cálcico para obtener óxido de calcio y el resto procede del consumo de combustibles. La producción de cemento contribuye con un 5% a un 7% a la cantidad total de emisión de CO₂.

El CO₂ cobra especial relevancia por su efecto sobre las condiciones climáticas del planeta debido a que es un gas que permanece activo en la atmósfera durante mucho tiempo. Del CO₂ emitido a la atmósfera, el 50% tardará 30 años en desaparecer, un 30% permanecerá varios siglos y el 20% restante estará presente durante miles de años (1). El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero, la mayor parte surge como consecuencia de las actividades humanas. Desde la Revolución Industrial la concentración de CO₂ en la atmósfera ha experimentado un fuerte aumento, ha pasado de unas 280 partes por millón en volumen (ppmv) en la época preindustrial a unas 390ppmv en 2009. En 2013 las mediciones medias mensuales de CO₂ superaron las 400ppmv (2).

La concentración de CO₂ aumenta en las grandes ciudades: Madrid (558ppmv), Lisboa (433ppmv), Roma (505ppmv), París (950ppmv); en zonas industriales; en el interior de túneles (400 a 600ppmv); en cocheras subterráneas y disminuye en ambientes rurales (300ppmv); en zonas de vegetación abundante y en las proximidades de las grandes masas de agua (224ppmv) (3). Aproximadamente el 50% de las emisiones permanecen en la atmósfera, el otro 50% es capturado por los océanos y la vegetación terrestre.

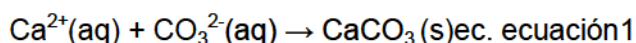
El hormigón y los materiales que utilizan cemento en su composición tienen la capacidad de fijar el CO₂ atmosférico de forma irreversible mediante el proceso de carbonatación del cemento. La carbonatación es un proceso lento que depende de variables vinculadas a la composición del hormigón y al medio en el que se halla emplazada la estructura. Desde el punto de vista teórico y para tiempos prolongados (muy superiores a la vida en servicio de las estructuras), la capacidad potencial de captación de CO₂ por el hormigón resulta igual a la cantidad de CO₂ liberada en la calcinación del CaCO₃ para la obtención del cemento.

Esta capacidad de reabsorción de las emisiones de CO₂ que presentan los productos derivados del cemento ha despertado recientemente un gran interés por su aporte a la sustentabilidad. En los últimos años se han realizado distintos trabajos con el objetivo de calcular el alcance de este fenómeno en EEUU (4) y en Europa (5). Los porcentajes de absorción obtenidos por los diferentes autores varían en función de las suposiciones y aproximaciones realizadas en los modelos utilizados.

En este trabajo se presenta el modelo de mayor consenso a nivel internacional propuesto para inferir la fijación del CO₂ durante la vida útil del hormigón. Se analizan las distintas variables, vinculadas a los materiales componentes y al medio de exposición, que contribuyen a la cinética del proceso de carbonatación. Se cuantifica la capacidad de captación del CO₂ de un pavimento industrial de hormigón. El objetivo que persiguen las experiencias que forman parte del presente trabajo es difundir los avances a nivel internacional referidos a considerar la capacidad que presentan los materiales cementicios para fijar, de forma irreversible, el CO₂ presente en la atmósfera.

Modelo de Difusión Aplicado al Proceso de Carbonatación

La carbonatación es una reacción química que conduce a la formación de carbonatos, en particular de calcio (CaCO₃), a partir del CO₂ presente en la atmósfera y los compuestos alcalinos que resultan de la hidratación del cemento, tal como se indica en la ecuación 1. El CO₂ ingresa al hormigón por difusión a través de la red de poros interconectados, la diferencia de concentración de CO₂ entre la superficie exterior y los poros del hormigón actúa como fuerza conductora.



Por tratarse de un proceso de difusión puede aplicarse la primera ley de Fick, que adaptada a la difusión del CO₂ en el hormigón se presenta en la ecuación 2.

$$dQ = D_c \cdot A \cdot (\Delta C/x) \cdot dt \text{ ecuación 2}$$

dQ: cantidad de CO₂ [kgCO₂] que difunde en el intervalo de tiempo dt [s].

D_c: coeficiente de difusión del CO₂ [m²/s] en el hormigón.

A: área de ingreso [m²].

ΔC: diferencia entre la concentración de CO₂ entre la atmósfera y el frente carbonatado [kgCO₂/m³].

x: profundidad de la capa carbonatada [m].

El CO₂ ingresa al hormigón por difusión y reacciona con los hidróxidos alcalinos presentes en la solución de poros dando lugar a la formación de carbonatos, proceso que puede representarse mediante la ecuación 3.

$$dQ = a \cdot A \cdot dx \text{ ecuación 3}$$

dQ: masa de CO₂ [kgCO₂] requerida para la completa carbonatación del depósito dx.

A: área de ingreso [m²].

dx: incremento en el depósito de carbonatación [m].

a: capacidad de combinación del CO₂ [kgCO₂/m³] en el hormigón no carbonatado.

El balance entre los procesos de difusión y reacción se expresan en la ecuación 4.

$$x \, dx = (D_c / a) \cdot \Delta C \cdot dt \text{ ecuación 4}$$

Asumiendo que D_c, a y ΔC no dependen del tiempo (t) ni del espacio (x), integrando la ecuación 4, se llega a la expresión (ecuación 5) que permite inferir el avance del frente carbonatado.

$$x_c = ((2 \cdot D_c \cdot \Delta C) / a)^{0.5} \cdot t^{0.5} \text{ ecuación 5}$$

De acuerdo al planteo efectuado, la ecuación 5 puede simplificarse dando lugar a la ecuación 6, conocida como expresión de la raíz cuadrada del tiempo, que permite inferir con buena aproximación el avance del frente carbonatado.

$$x_c = K \cdot t^{0.5} \quad \text{ecuación 6}$$

K: velocidad de carbonatación [mm/año^{0.5}], resulta sensible a variables vinculadas a las características del hormigón y al medio de exposición.

Mecanismo de Captación del Dióxido de Carbono en el Hormigón

Para inferir la cantidad de CO₂ que puede fijar el hormigón es necesario determinar la profundidad de carbonatación (x_c) utilizando la ecuación 6, donde t representa la vida en servicio de la estructura y el valor de K surge de considerar diferentes factores que intervienen en la velocidad de carbonatación, según se observa en la ecuación 7.

$$K = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad \text{ecuación 7}$$

k_1 : velocidad de carbonatación en el hormigón elaborado con cemento pórtland normal sin adiciones, definida en función de la clase resistente del hormigón y el tipo de exposición, según se informa en la Tabla 1. El tipo de exposición, en particular la humedad relativa del medio, influye en el contenido de humedad del hormigón. La mayor velocidad de carbonatación se da para contenidos de humedad en el hormigón comprendidos entre el 60% y el 80%, por debajo del 60% se reduce el agua disponible para las reacciones de carbonatación y por encima del 80% el exceso de agua en los poros dificulta la difusión del CO₂.

Tabla 1: Velocidad de carbonatación en función de la clase resistente del hormigón y el tipo de exposición

Tipo de exposición	k_1 [mm/año ^{0.5}]			
	Clases resistentes [MPa]			
	< 15	15-20	25-35	> 35
Expuesto	5	2.5	1.5	1.0
Protegido	10	6	4	2.5
Interior	15	9	6	3.5
Húmedo	2	1.0	0.75	0.5
Enterrado	3	1.5	1.0	0.75

k_2 : factor que tiene en cuenta el tipo de cemento. La incorporación de adiciones al cemento reduce la cantidad de clinker y modifica las propiedades del ligante. Las adiciones incorporadas pueden ser activas o inertes, según formen o no compuestos cementicios. En general, los cementos con adiciones manifiestan una mayor velocidad de carbonatación asociada a la menor reserva alcalina, debido a que disminuye el contenido de clinker en la formulación del ligante y a la reacción puzolánica de las adiciones activas que consumen hidróxido de calcio para formar compuestos cementicios.

En la Tabla 2 se presentan los valores de k_2 para cementos en los que se incorporan distintos porcentajes de adiciones inertes (filler calcáreo) o activas (humos de sílice, cenizas volantes, escoria granulada de alto horno).

Tabla 2: Valores del factor k_2 que modifica la velocidad de carbonatación de cementos con adiciones.

Cantidad de adición incorporada en reemplazo del clinker	k_2	Cantidad de adición incorporada en reemplazo del clinker	k_2
5-10% humos de sílice	1.05	30% cenizas volantes	1.10
15% filer calcáreo	1.05	20% escoria granulada de alto horno	1.10
30% filer calcáreo	1.10	40% escoria granulada de alto horno	1.20
15% cenizas volantes	1.05	60% escoria granulada de alto horno	1.30

k_3 : factor que considera el futuro incremento en la concentración de CO_2 en la atmósfera. A pesar de las medidas tomadas a nivel internacional, la concentración de CO_2 continúa en aumento y los incrementos estimados para los próximos 100 años aumentarían la velocidad de carbonatación en un 50%, por lo que a k_3 se le asigna un valor de 1.5 (6).

k_4 : factor que tiene en cuenta el recubrimiento aplicado sobre el hormigón. La velocidad de carbonatación disminuye cuando el hormigón es sometido a un tratamiento superficial, según el tipo y espesor del tratamiento k_4 toma valores comprendidos entre 0.7 y 0.9, al hormigón sin protección se le asigna el valor 1.

Determinada la profundidad de carbonatación (x_c) con la ecuación 6, se calcula la superficie expuesta del elemento constructivo y con estos dos valores se obtiene el volumen de hormigón carbonatado. Luego se determina la cantidad de cemento en el volumen carbonatado, la cantidad de clinker en el cemento, se asume que el clinker contiene un 65% de óxido de calcio (CaO) y se considera que el 75% de todo el CaO presente en el clinker puede carbonatarse (7).

Teniendo en cuenta las consideraciones y suposiciones realizadas, la cantidad de CO_2 que puede fijar el hormigón se infiere con la ecuación 8.

$$\text{CO}_{2(\text{fijado})} = x_c \cdot S_{\text{EH}} \cdot C \cdot C_c \cdot C_{\text{CaO}} \cdot 0.75 \cdot (M_{\text{CO}_2}/M_{\text{CaO}}) \quad \text{ecuación 8}$$

x_c : profundidad de carbonatación [m].

S_{EH} : superficie expuesta del elemento constructivo [m^2].

C : cantidad de cemento en el volumen carbonatado [kg/m^3].

C_c : cantidad de clinker en el cemento [%].

C_{CaO} : cantidad de CaO presente en el clinker [%].

M_{CO_2} : masa molar del CO_2 .

M_{CaO} : masa molar del CaO .

Aplicación del Modelo a un Pavimento Industrial de Hormigón

Estas experiencias forman parte de un trabajo realizado por la Unidad de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Civil (UIDIC) del Departamento de Construcciones, en el que se ha evaluado la calidad de un pavimento industrial de hormigón colocado en un recinto cubierto destinado al depósito de grúas. Las propiedades determinadas para definir las características del hormigón han sido utilizadas para inferir la capacidad de fijación de CO_2 del pavimento considerando una vida útil de 50 años.

De acuerdo a las evaluaciones realizadas la resistencia del hormigón resultó ser de 30MPa y el contenido de cemento de 350 kg/m³. Según información suministrada por la planta hormigonera el cemento utilizado corresponde a un cemento pórtland normal (CPN), con un contenido de clínker que varía entre 90% a 100% según Norma IRAM 50000(8), en estas experiencias se ha asumido un porcentaje de clínker del 95%. Las dimensiones del pavimento, 10 m por 20 m por 0.20 m, conducen a una superficie de 200 m².

Para clase resistente 30 MPa y ambiente interior, de la Tabla 1 surge que k_1 vale 6mm/año^{0.5}; por tratarse de un cemento CPN que no contiene adiciones k_2 toma un valor unitario; k_3 resulta ser igual a 1.5 y k_4 vale 1 porque sobre el hormigón no se ha aplicado ninguna protección superficial. Con estas consideraciones resulta una velocidad de carbonatación K de 9 mm/año^{0.5}, que al cabo de los 50 años de vida útil conducirá a una profundidad de carbonatación de 64mm y a un volumen de hormigón carbonatado de 12.8m³.

La cantidad de cemento en el volumen de hormigón carbonatado resulta ser de 4480 kg, la cantidad de clínker de 4256 kg y el contenido de CaO de 2766 kg; reemplazando estos valores en la ecuación 8, la cantidad inferida de CO₂ que fijará el hormigón al cabo de 50 años será de 1630 kg.

Teniendo en cuenta el volumen de hormigón colocado en el pavimento, el contenido de cemento, clínker y CaO en dicho volumen; la cantidad estimada de CO₂ liberado al medio en el proceso de calcinación del CaCO₃ es de 6793 kg.

En el balance final surge que el hormigón al cabo de 50 años habrá captado un 24% del CO₂ liberado en la calcinación del CaCO₃ y un 14% si se considera la cantidad total de CO₂ emitida en la fabricación del cemento, teniendo en cuenta el proceso de calcinación más el que resulta del consumo de combustibles. Los porcentajes fijados por el hormigón resultan interesantes y deberían tenerse en cuenta cuando se considera la carga ambiental de CO₂ aportada por los materiales que contienen cemento en su composición.

En nuestro país, además de cemento pórtland normal (CPN) se utilizan los cementos pórtland compuestos (CPC) y con filler calcáreo (CPF). Si bien se desconoce la composición exacta de estos cementos, según la Norma IRAM 50000 (8) el CPC contiene de 98% a 65% de clínker y dos o más adiciones (puzolana natural, escoria y filler calcáreo) en cantidad que no supere el 35%; el CPF posee de 99% a 80% de clínker y no más del 20% de filler calcáreo. Con la finalidad de indagar sobre la capacidad de fijación del CO₂ en hormigones elaborados con estos cementos, se ha tomado el ejemplo del pavimento industrial de hormigón y se ha reemplazando el CPN por el CPC y CPF. En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 3: Liberación y fijación de CO₂ en el pavimento de hormigón elaborado con cementos CPN, CPC y CPF.

Tipo de Cemento	CO ₂ liberado en la calcinación del CaCO ₃ [kg]	CO ₂ fijado por el hormigón [kg]	CO ₂ fijado respecto del CO ₂ liberado [%]
CPN	6793	1630	24
CPC	4648	1220	26
CPF	6078	1527	25

Si se comparan los valores obtenidos con los tres tipos de cementos, se observa que en los cementos con adiciones (CPC y CPF), la reducción del contenido de clínker produce efectos opuestos, por un lado disminuye la liberación del CO₂ por calcinación del CaCO₃, pero al mismo tiempo también reduce la capacidad de combinación de CO₂ en el tiempo. El balance

final entre el CO₂ liberado y luego capturado por los hormigones elaborados con cementos CPN, CPC y CPF conduce a diferencias prácticamente despreciables.

En este trabajo no se ha considerado la captación de CO₂ por parte del hormigón que al finalizar su vida útil es sometido a un proceso de demolición. Con la finalidad de preservar recursos naturales no renovables, se ha comenzado a reemplazar parte de los agregados naturales utilizados en el hormigón por aquellos que provienen de la trituración del hormigón. En las plantas de trituración, los grandes fragmentos de hormigón se reducen a distintas fracciones que luego permanecen en acopio. Durante este período la pasta de cemento que ha quedado adherida al agregado rápidamente se carbonata, por la mayor superficie de exposición, contribuyendo a la captación de cantidades importantes de CO₂. Los modelos disponibles para estimar la captura de CO₂ por parte del hormigón contemplan únicamente el período referido a la vida útil y no consideran, aún, la capacidad de combinación del hormigón reciclado.

Conclusiones

Cuando se considera la contribución de la industria del cemento y del hormigón a la carga ambiental de CO₂, también se debe contemplar la capacidad de fijación de CO₂ por parte de los materiales cementicios. De acuerdo al modelo utilizado, se ha inferido que al cabo de 50 años el pavimento industrial llegará a capturar un 14% del total de CO₂ liberado en la fabricación de la cantidad de cemento utilizado en el hormigón.

La tendencia actual es la de considerar dentro del análisis del ciclo de vida de una estructura la interacción con el medio ambiente durante la construcción, uso y posterior demolición. Un aporte importante a la sustentabilidad sería el de incorporar en el proyecto la capacidad de la estructura para fijar CO₂ durante la vida útil, posterior demolición y reciclado. Hecho que va a permitir evaluar y comparar distintas alternativas de diseño con el fin de mejorar el impacto ambiental de las construcciones de hormigón.

Bibliografía

- (1). Solomon F. "Technical Summary. Climate Change 2007: The Physical Science Basis". Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007.
- (2). Administración Nacional de Océanos y Atmósfera de los Estados Unidos-NOAA. "Informe Observatorio de Mauna Loa, Hawaii". 2013.
- (3). Luković M., Ignjatović I. "Application of carbonation model for service life design to Serbian environmental conditions and engineering practice". Proc. Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites. Amsterdam, Netherlands. 2012.
- (4). Gajda J., Miller F., "Concrete as a Sink for Atmospheric Carbon Dioxide: a Literature Review and Estimation of CO₂ Absorption by Portland Cement Concrete". PCA, Chicago, R&D Serial N° 2255. 2000.
- (5). Kjellsen K., Guimaraes M., Nilsson A. "The CO₂ balance of concrete in a life perspective". Danish Technological Institute, DTI, ISBN: 87-7756-758-7. 2005.
- (6). Fukushima T., "Theoretical investigation on the influence of various factors on carbonation of concrete". Building Research Institute, Japan. BRI Research Paper N° 127 ISSN 0453-4972, Japan. 1988.
- (7). Lagerblad B. "Carbon dioxide uptake during concrete life cycle. State of the art". Swedish Cement and Concrete Research Institute. CBI Report 2. ISBN 91-976070-0-2. 2005.
- (8). Norma IRAM 50000:2000. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción.